


# Piezolan

Ausgabe 1976



E x p o r t e u r :

Elektrotechnik Export-Import

Volkseigener Außenhandelsbetrieb
der Deutschen Demokratischen Republik

DDR-102 Berlin, Alexanderplatz
Haus der Elektroindustrie

KOMBINAT VEB KERAMISCHE WERKE HERMSDORF · DDR 653 HERMSDORF / THÜRINGEN

Fernsprecher: Hermsdorf, Sa.-Nr. 5 10 Drahtwort: Kaweha Hermsdorfthür Telex: 058 246

## 1. Allgemeine Einführung

Piezoelektrische Materialien sind auf Grund der hervorragenden Möglichkeiten der Energieumwandlung sehr gut in die Technik eingeführt. Entsprechend der Natur des Piezoeffektes bietet sich sowohl die mechanisch-elektrische Energieumwandlung (direkter Piezoeffekt) als auch die elektrisch-mechanische Energieumwandlung (reziproker Piezoeffekt) an.

Durch die Entwicklung der polykristallinen (keramischen) piezoelektrischen Werkstoffe, ausgehend vom Bariumtitanat, lassen sich viele Anwendungsfälle bequem realisieren. Die keramische Herstellungsmethode synthetischer piezoelektrischer Werkstoffe ist nicht nur relativ billig, insbesondere im Hinblick auf eine Massenproduktion, keramische Körper lassen sich auch in den unterschiedlichsten Formen herstellen, die oft bei einkristallinen Werkstoffen überhaupt ausgeschlossen sind, außerdem hat es sich herausgestellt, daß die Modifikation des Piezoeffektes der Keramik in verschiedener Hinsicht möglich ist. Besonders geeignet sind dazu die neueren Mischkeramiken auf der Basis des Blei-Zirkonattitanat, die sich im allgemeinen durch einen sehr großen piezoelektrischen Effekt und Beständigkeit auszeichnen.

Bei den keramischen piezoelektrischen Materialien handelt es sich um ferroelektrische Materialien, die mehr oder weniger ausgeprägte Temperaturabhängigkeiten der dielektrischen und elektromechanischen Eigenschaften vor allem in der Umgebung eines sogenannten Curiepunktes zeigen, an dem eine kristallografische Phasenumwandlung vor sich geht. Unterhalb dieses Curiepunktes ist bei Einstellung eines bestimmten Ordnungszustandes der Piezoeffekt der Keramik zu erwarten.

Infolge des polykristallinen Gefüges der interessierenden Keramiken sind die Materialien zunächst isotrop und zeigen keinen Piezoeffekt. Wird aber an einen solchen keramischen Körper über Elektroden ein elektrisches Gleichfeld angelegt, stellt sich eine bevorzugte Orientierung von Dipolbereichen (Domänen) durch Polarisation in Richtung einer „polaren" Achse, die eine Bedingung für das Auftreten eines mehr oder weniger ausgeprägten Piezoeffektes ist, ein. Entscheidend ist dabei, daß die polarisierten (gepolten) Keramiken bei Wegnahme des Gleichfeldes die bevorzugte Orientierung behalten (remanente Polarisation). Die ferroelektrische Keramik wird damit dem piezoelektrischen Einkristall sehr ähnlich. Die dielektrischen und elektromechanischen Eigenschaften sind anisotrop. Das Verhalten des jeweiligen Wandlers hängt zudem noch von seinen geometrischen Verhältnissen ab.

## 2. Begriffe zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der piezoeletrischen Materialien

Unter normalen Betriebsbedingungen bestehen bei der gepolten piezoelektrischen Keramik wie bei den piezoelektrischen Kristallen lineare Beziehungen zwischen den elastischen Spannungs- und Deformationskomponenten bzw. den Komponenten des elektrischen Feldes und der dielektrischen Verschiebung. Diese linearen Beziehungen werden durch richtungsabhängige Konstanten beschrieben, die entsprechend den verwendeten abhängigen und unabhängigen Variablen in Definitionsbeziehungen auftreten, die die möglichen elektromechanischen Zusammenhänge beschreiben.

Verabredungsgemäß werden für die Variablen folgende Symbole verwendet.

D = Deformation
S = mechanische Spannung (Zug, Druck)
T = elektrische Feldstärke
E = dielektrische Verschiebung

Die mechanischen, elektrischen und elektromechanischen Eigenschaften, vermittelt durch die jeweiligen richtungsabhängigen Konstanten der piezoelektrischen Materialien, werden in rationalisierten mks-Einheiten ausgedrückt.

### 2.1. Elastische Konstanten

Die elastischen Konstanten beschreiben den Zusammenhang zwischen der Deformation S und der mechanischen Spannung T oder der mechanischen Spannung T und der Deformation S.

Demzufolge unterscheidet man zwischen der elastischen Nachgiebigkeit oder schlechthin dem „Elastizitätskoeffizienten" s und dem elastischen Steifigkeitskoeffizienten oder dem „Elastizitätsmodul" c. Dabei sind die elektrischen Grenzbedingungen infolge der Wechselwirkung von mechanischer (elastischer) und elektrischer Energie zu beachten,

$$s^E = \left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)_E \qquad s^D = \left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)_D$$

$$c^E = \left(\frac{\delta T}{\delta S}\right)_E \qquad c^D = \left(\frac{\delta T}{\delta S}\right)_D$$

z. B. ist $s^E$ die elastische Nachgiebigkeit bei konstanter elektrischer Feldstärke.

### 2.2. Dielektrizitätskonstanten (DK)

In die dielektrischen Eigenschaften, die durch die Dielektrizitätskonstanten $\varepsilon$ ausgedrückt werden, gehen infolge der Wechselwirkung von mechanischer und elektrischer Energie die mechanischen Grenzbedingungen ein

$$\varepsilon^T = \left(\frac{\delta D}{\delta E}\right)_T \text{ freie DK}$$

$$\varepsilon^S = \left(\frac{\delta D}{\delta E}\right)_S \text{ geklemmte DK.}$$

Das Verhältnis aus der absoluten DK und der DK des freien Raumes $\varepsilon_o$ ($\varepsilon_o = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{F \cdot m^{-1}}$) ergibt die relative DK $\varepsilon_r$, die häufig verwendet wird.

$$\varepsilon_r^T = \frac{\varepsilon^T}{\varepsilon_o}$$

### 2.3. Piezoelektrische Konstanten

Die gewöhnlich verwendeten elektromechanischen Konstanten sind der elektromechanische Kopplungsfaktor k, die Deformationskonstante d und die Druckkonstante g. Außerdem ist in bestimmten Fällen die piezoelektrische Spannungskonstante e von Interesse.

#### 2.3.1. Kopplungsfaktor k

Der elektromechanische Kopplungsfaktor k wird allgemein verwendet. Er ist ein Maß für die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische und umgekehrt.

Das Quadrat des Kopplungsfaktors ist gleich der umgewandelten Energie dividiert durch die gesamte eingespeiste Energie.

#### 2.3.2. Piezoelektrische d-Konstante (Piezomodul)

Die d-Konstante liefert die für eine vorgegebene Feldstärke spezifische Deformation bei konstanter äußerer Spannung, daher ist

$$d = \left(\frac{\delta S}{\delta E}\right)_T$$

#### 2.3.3. Piezoelektrische g-Konstante

Die g-Konstante gibt die Leerlaufspannung bei gegebener elastischer Spannung an und wird oft als elasto-elektrischer Koeffizient (Piezoelektrische Druckkonstante) bezeichnet:

$$g = -\left(\frac{\delta E}{\delta T}\right)_D$$

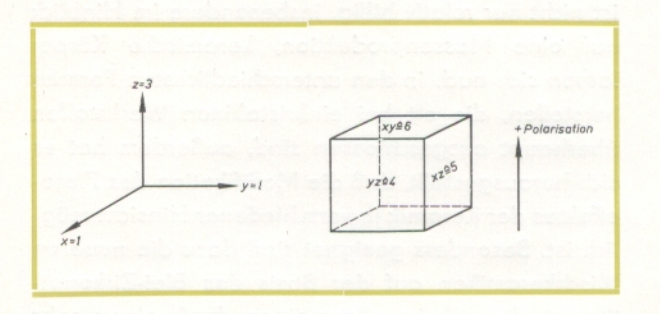
#### 2.3.4. Piezoelektrische Spannungskonstante e

Bei einem an den Enden fest eingespannten piezoelektrischen Element ist der „e"-Koeffizient die bei einer bestimmten Feldstärke gemessene Druck- oder Zugspannung

$$e = -\left(\frac{\delta T}{\delta E}\right)_S$$

## 3. Die Richtungsabhängigkeit der elastischen, dielektrischen und piezoelektrischen Konstanten gepolter ferroelektrischer Keramik

Die unpolarisierte isotrope Keramik wird nach der Polarisation im elektrischen Gleichfeld ein Material mit einer zweidimensionalen Isotropie in der zur Polarisationsrichtung senkrechten Ebene. Die gepolte Keramik läßt sich kristallografisch einordnen. Die polare Achse der Keramik wird dabei als z-Achse angenommen, und jede hierzu senkrechte Richtung kann als x-Achse gewählt werden. Die in der gepolten Keramik vorliegenden Beziehungen werden am besten für einen Quader erläutert.




Neben den Ziffern 1–3 werden die Ziffern 4–6 verwendet, die die Flächen bezeichnen. Damit wird eine doppelte Indizierung der den keramischen Körper beschreibenden Konstanten sinnvoll, die in folgender Weise benutzt wird:

Der erste Index bezeichnet beispielsweise die Richtung des angelegten elektrischen Feldes, der zweite Index die Richtung der geometrischen Deformation unter Einwirkung des Feldes.

Zur Vorpolarisation des Quaders in Richtung 3 seien Elektroden an den beiden Flächen xy = 6 angebracht. Wirkt ein elektrisches Anregungsfeld in Polarisationsrichtung, deformiert sich der Quader in Richtung z = 3. Die hierfür gültige Piezokonstante ist $d_{33}$. Für eine Deformation in Richtung x = 1 wird $d_{31}$ verwendet. Ein elektrisches Feld senkrecht zur Polarisationsrichtung (Feldelektroden an den Flächen yz = 4) bewirkt eine Scherung der Flächen xz = 5, die zuständige Piezokonstante ist demnach $d_{15}$. Neben diesen drei Piezokonstanten ergeben sich unter dem gleichen Gesichtspunkt für die Keramik jeweils fünf elastische Konstanten und zwei Dielektrizitätskonstanten, die von Null verschieden sind:

$s_{11}$, $s_{12}$, $s_{13}$, $s_{33}$, $s_{55}$,
$\varepsilon_{11}$, $\varepsilon_{33}$.

Im allgemeinen gelten auch für die elektromechanischen Kopplungsfaktoren die gleichen Betrachtungen wie für die Piezokonstanten. Diese Kopp-

lungsfaktoren werden jeweils unter konstanten äußeren Spannungen angegeben. Allerdings haben zwei Sonderfälle eine große praktische Bedeutung. Ein Spezialfall ist die Anregung dünner Platten. Die Kopplung wird dann durch $k_t$ identifiziert. Ein anderer Spezialfall berücksichtigt die Kopplung zwischen elektrischem Feld in Richtung 3 und gleichzeitiger Wirkung in den Richtungen 1 und 2. Diese planare Kopplung wird durch das Symbol $k_r$ beschrieben. $k_r$ ist ein sehr wichtiger Faktor, da er sich leicht mit großer Genauigkeit messen läßt und ein einfaches Maß für die Effektivität der Polarisation von keramischen Testproben darstellt.

## 4. Anregungszustände

Die piezoelektrischen Wandler können in zwei große Kategorien unterteilt werden, die sich aus der Möglichkeit der quasistatischen (weit unterhalb der mechanischen Eigenresonanz) und der Resonanzanregung ergeben. Unterhalb der Resonanz betriebene Anordnungen umfassen Tonabnehmer, Mikrofone, Kopfhörer, Accelerometer, Hochspannungsquellen und einige Unterwasser-Schallempfänger (Hydrophone), während sämtliche Ultraschallwandler und Unterwasser-Leistungsschallgeber und auch Wandler für Verzögerungsleitungen und Materialprüfköpfe Resonatoren sind.

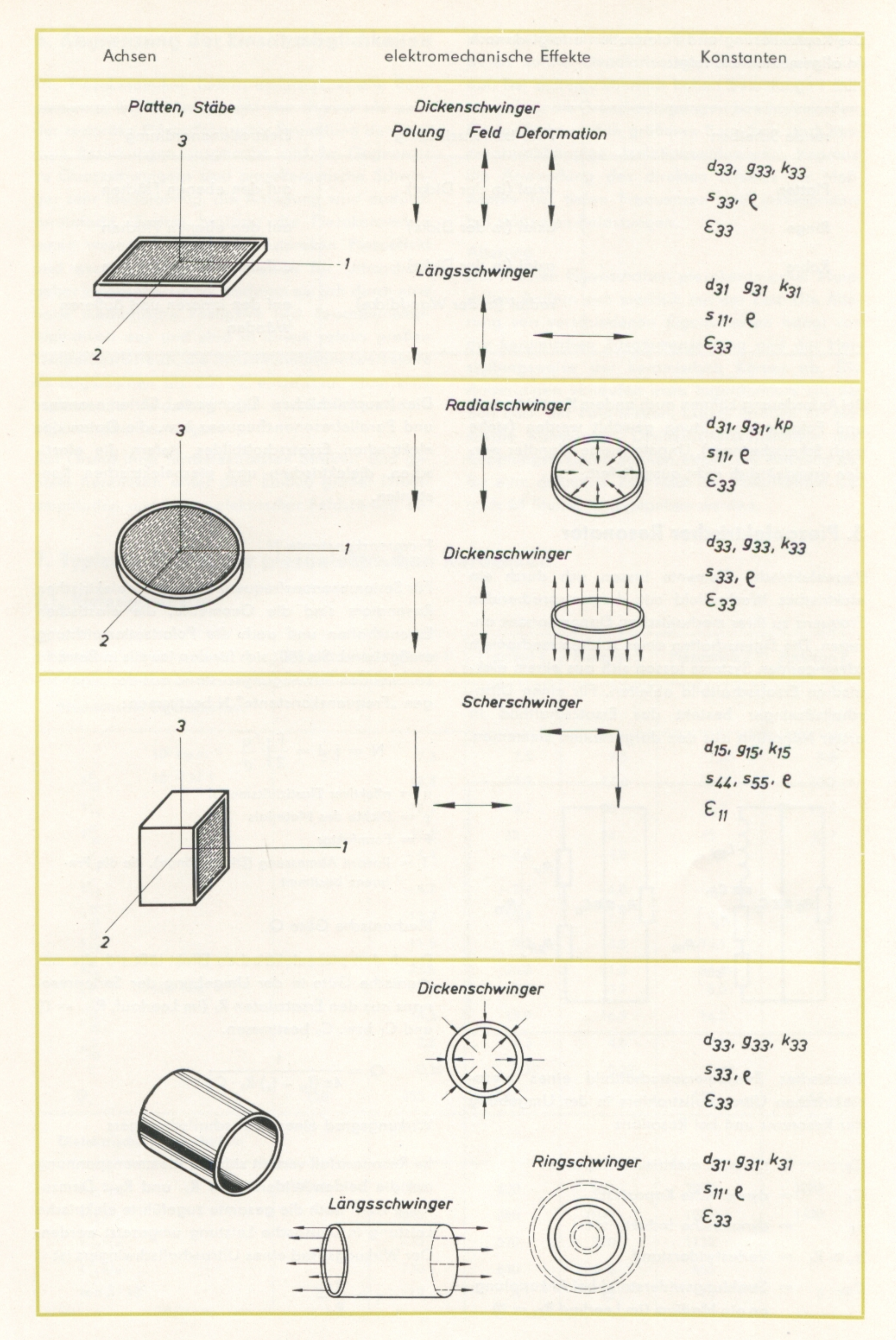
Das Gebiet der Betriebsfrequenzen erstreckt sich von den niedrigsten Frequenzen im Hörbereich von 0 Hz bis etwa 10 MHz, wobei die oberen Frequenzen ausschließlich von Resonatoren erfaßt werden, die darüber hinaus in den Harmonischen angeregt werden können.

Die beiden Kategorien der piezoelektrischen Wandler stellen sich in vielfältigen Formen dar. In der Übersicht sind die grundsätzlichen Zustände dargestellt, die durch die zur Verfügung stehenden Konstanten ausreichend beschrieben werden können. Daneben können Resonatoren auch in Form von Ringen, Kugelkalotten und Rohrsegmenten hergestellt werden.

Als Resonanzfrequenz der Ultraschallschwinger wird, falls nicht anders vermerkt, die der Dickenschwingung angegeben. Die jeweilige Wandstärke s richtet sich dann unter Berücksichtigung der Toleranzen nach der Frequenzkonstanten N (vgl. 7.1) des verwendeten Werkstoffs. Wenn man unter der Frequenzkonstanten $N_d$ (Hz.m) das Produkt aus der Wandstärke s und der Grundresonanzfrequenz der Dickenschwingung versteht, dann lassen sich die Wandstärken s (mm) den Resonanzfrequenzen f (MHz) bei Verwendung der Werkstoffe Piezolan A, F, L, S und S 2 in folgender Tabelle zuordnen:

| Resonanzfrequenz f | Wandstärke s (mm) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| MHz | Piezolan A | Piezolan F | Piezolan L | Piezolan S | Piezolan S 2 |
| 0,25 | 10,00 | 7,80 | 8,40 | 8,00 | 8,60 |
| 0,30 | 8,35 | 6,50 | 7,00 | 6,70 | 7,15 |
| 0,40 | 6,25 | 4,90 | 5,25 | 5,0 | 5,40 |
| 0,50 | 5,00 | 3,90 | 4,20 | 4,00 | 4,30 |
| 0,80 | 3,10 | 3,45 | 2,60 | 2,50 | 2,70 |
| 1,00 | 2,50 | 1,95 | 2,10 | 2,00 | 2,15 |
| 1,25 | 2,00 | 1,55 | 1,70 | 1,60 | 1,72 |
| 1,50 | 1,65 | 1,30 | 1,40 | 1,35 | 1,43 |
| 2,00 | 1,25 | 0,98 | 1,05 | 1,00 | 1,07 |
| 2,40 | 1,05 | 0,81 | 0,88 | 0,84 | 0,90 |
| 3,00 | 0,84 | 0,65 | 0,70 | 0,67 | 0,72 |
| 4,00 | 0,63 | 0,39 | 0,53 | 0,50 | 0,54 |
| 5,00 | 0,50 | 0,49 | 0,42 | 0,40 | 0,43 |
| 6,00 | 0,42 | 0,33 | 0,35 | 0,33 | 0,36 |
| 7,50 | 0,33 | 0,26 | 0,28 | 0,27 | 0,29 |
| 10,00 | 0,25 | 0,20 | 0,21 | 0,20 | 0,22 |

Bei Verwendung anderer Schwingungsformen sind bei der Dimensionierung die betreffenden Frequenzkonstanten, die unter 7.1 aufgeführt sind, zu beachten.


Achsen
elektromechanische Effekte
Konstanten
Platten, Stäbe
Dickenschwinger
Polung
Feld
Deformation
3
1
2
$d_{33}$, $g_{33}$, $k_{33}$
$s_{33}$, $\varrho$
$\varepsilon_{33}$
Längsschwinger
$d_{31}$ $g_{31}$ $k_{31}$
$s_{11}$, $\varrho$
$\varepsilon_{33}$
Radialschwinger
$d_{31}$, $g_{31}$, $k_p$
$s_{11}$, $\varrho$
$\varepsilon_{33}$
Dickenschwinger
$d_{33}$, $g_{33}$, $k_{33}$
$s_{33}$, $\varrho$
$\varepsilon_{33}$
Scherschwinger
$d_{15}$, $g_{15}$, $k_{15}$
$s_{44}$, $s_{55}$, $\varrho$
$\varepsilon_{11}$
Dickenschwinger
$d_{33}$, $g_{33}$, $k_{33}$
$s_{33}$, $\varrho$
$\varepsilon_{33}$
Ringschwinger
$d_{31}$, $g_{31}$, $k_{31}$
$s_{11}$, $\varrho$
$\varepsilon_{33}$
Längsschwinger

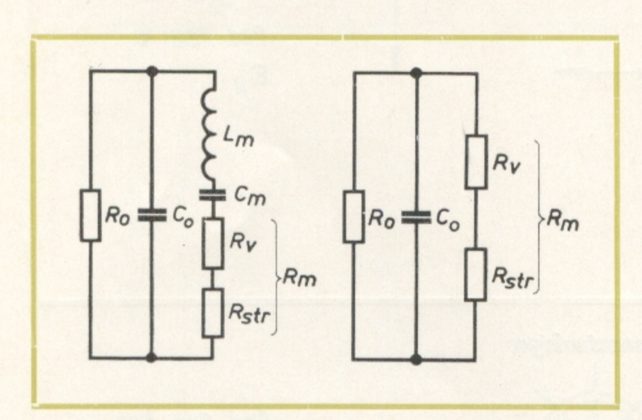
Die Kontaktierung und Polarisation erfolgt danach im allgemeinen wie folgt:

| runde Scheiben | Polarisationsrichtung | Elektrodenanordnung |
|---|---|---|
| Platten | axial (in der Dicke) | auf den ebenen Flächen |
| Ringe | axial (in der Dicke) | auf den ebenen Flächen |
| Rohre | axial (in der Dicke) | auf den ebenen Flächen |
| | radial (in der Wanddicke) | auf den inneren und äußeren Wänden |

Bei Anforderung können auch andere Kontaktierung und Polarisationsrichtung gewählt werden (siehe auch Scherschwinger). Unpolarisierte Wandler werden grundsätzlich nicht ausgeliefert.

## 5. Piezoelektrischer Resonator

Piezoelektrische Elemente lassen sich durch ein elektrisches Wechselfeld mit der entsprechenden Frequenz zu ihrer mechanischen Eigenresonanz anregen. Die Eigenschaften eines solchen mechanisch schwingenden Systems lassen sich aus einem elektrischen Ersatzschaltbild ableiten. Für einen Ultraschallschwinger besteht das Ersatzschaltbild in erster Näherung aus den dargestellten Elementen.




Elektrisches Zweipolersatzschaltbild eines piezoelektrischen Ultraschallstrahlers in der Umgebung der Resonanz und bei Resonanz

$C_0$ = normale elektrische Kapazität

$C_1$ = dynamische Kapazität

$L_1$ = dynamische Induktivität

$R_v \simeq R_1$ = Verlustwiderstand

$R_{Str}$ = Strahlungswiderstand bei Ankopplung an ein Medium (im Leerlauf $R_{Str} = 0$)

Die hauptsächlichen Eigenwerte, Serienresonanz- und Parallelresonanzfrequenz bzw. die Daten des elektrischen Ersatzschaltbildes, liefern die elastischen, dielektrischen und piezoelektrischen Konstanten.

Frequenzkonstante N

Für Serienresonanzfrequenz eines piezoelektrischen Resonators sind die Geometrie, die elastischen Eigenschaften und auch die Polarisationsrichtung maßgebend. Sie läßt sich für den jeweils in Betracht kommenden Schwingungszustand aus der zugehörigen „Frequenzkonstante" N bestimmen:

$$N = f \cdot l = \frac{F}{2}\sqrt{\frac{q}{\varrho}}$$

q = effektiver Elastizitätsmodul

$\varrho$ = Dichte des Materials

F = Formfaktor

l = lineare Abmessung (Dicke, Länge), die die Frequenz bestimmt

Mechanische Güte Q

Durch den piezoelektrischen Effekt läßt sich die mechanische Güte in der Umgebung der Serienresonanz aus den Ersatzdaten $R_1$ (im Leerlauf, $R_{Str} = 0$) und $C_1$ bzw. $C_0$ bestimmen.

$$Q = \frac{1}{4\pi (f_p - f_s) R_1 \cdot C_0}$$

Wirkungsgrad eines Ultraschallschwingers

Im Resonanzfall verteilt sich die Klemmenspannung auf die beiden Widerstände $R_v$ und $R_{Str}$. Demzufolge kann auch die gesamte zugeführte elektrische Leistung in akustische Leistung umgesetzt werden. Der Wirkungsgrad eines Ultraschallschwingers ist

$$\eta = \frac{R_{Str}}{R_m}$$

## 6. Abgrenzung der Einsatzmöglichkeiten

Die Piezokeramiken liefern elektroakustische Bauelemente, bei denen sowohl der direkte als auch der reziproke Piezoeffekt unter Einhaltung der linearen Beziehungen ausgenutzt wird. Im Gegensatz zu Quarzschwingern sind piezokeramische Schwinger sehr niederohmig, die Anregung wird dadurch vereinfacht. Zudem besitzen die Piezokeramiken einen wesentlich größeren reziproken Piezoeffekt und werden daher vorzugsweise für Ultraschallgeber eingesetzt. Dabei zeichnen sie sich durch eine hohe mechanische Festigkeit und Feuchteunempfindlichkeit aus und sind in einem relativ großen Temperaturbereich, die Bleizirkonattitanatwerkstoffe im allgemeinen bis 200 °C, einsetzbar, ohne eine bedeutende Änderung der elektromechanischen Eigenschaften zu zeigen.

Auf Grund ihrer ferroelektrischen Struktur sind gepolte Keramiken unter dem Einfluß großer Druckamplituden und hoher elektrischer Feldstärken depolarisierbar. Unter normalen Betriebsbedingungen treten solche Depolarisationserscheinungen nicht auf, bei außergewöhnlich hohen Belastungen sollten jedoch die Grenzbedingungen beachtet werden. Der endliche und in größeren Bereichen stark temperaturabhängige Isolationswiderstand begrenzt die Anwendung des direkten Effektes für Meßzwecke bei tiefen Frequenzen und insbesondere bei statischen Belastungen.

Alterung

Die meisten Eigenschaften piezokeramischer Materialien ändern sich merklich mit der Zeit. Die Alterung von verschiedenen Eigenschaften hängt von der keramischen Zusammensetzung und der Herstellungsweise der keramischen Körper ab. Die Änderungen verlaufen etwa logarithmisch mit der Zeit nach der Polarisation. Exakte Größen für elastische Konstanten, Dielektrizitätskonstanten und Kopplungsfaktoren können wegen der Alterung nur für eine definierte Zeit nach der Polarisation, i. a. nach 24 Stunden, angegeben werden.

## 7. Typische Daten der piezoelektrischen Keramiken

### 7.1. Kleinsignalwerte

| Symbol | Dimension | Piezolan A | Piezolan F | Piezolan L | Piezolan S | Piezolan S 2 | Piezolan T |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mechanische Eigenschaften** | | | | | | | |
| | $10^3$ kg $m^{-3}$ | 5,5 | 7,3 | 7,5 | 7,5 | 7,85 | 7,8 |
| $s_{33}^E$ | $10^{-12}$ $N^{-1}$ | | 14,4 | 14,9 | 17,6 | 18,0 | 12,0 |
| $s_{11}^E$ | | | 12,3 | 8,7 | 15 | 14,7 | 11,4 |
| $s_{55}^E$ | | | 35,2 | 32 | 34 | 45 | 30,7 |
| $s_{12}^E$ | | | −4,4 | −2,8 | −4,8 | −3,7 | |
| $s_{13}^E$ | | | −4,7 | −7,7 | −6,0 | −4,2 | |
| $s_{33}^D$ | | | 13,3 | 10,4 | 11,7 | 9,4 | |
| $s_{11}^D$ | | | 11,6 | 8,2 | 13,8 | 13,1 | |
| $s_{55}^D$ | | | 23,6 | 23,2 | 21,8 | 26,2 | |
| $c_{33}^E$ | $10^{10}$ $Nm^{-2}$ | | 11,2 | 13,5 | 13,2 | 8,5 | |
| $c_{33}^D$ | | | 16,3 | 15,9 | 16,9 | 16,3 | |
| $c_{55}^D$ | | | 2,8 | 4,3 | 4,6 | 3,8 | |
| E | | | 0,36 | 0,32 | 0,32 | 0,40 | |
| $Q_r$ | | 150 | 450 | 350 | 80 | 100 | 360 |
| **Dielektrische Eigenschaften** | | | | | | | |
| $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ | | 1000 | 1000 | 800 | 800 | 2200 | 1200 |
| $\varepsilon_{11}^T/\varepsilon_0$ | | | 1040 | 880 | 1040 | 1980 | 1430 |
| $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$ | | | 670 | 570 | 320 | 1130 | |
| $\varepsilon_{11}^S/\varepsilon_0$ | | | 730 | 630 | 665 | 665 | |
| $\tan\delta \cdot 10^3$ | | 15 | 15 | 8 | 25 | 15 | 5 |

| Symbol | Dimension | Piezolan A | Piezolan F | Piezolan L | Piezolan S | Piezolan S 2 | Piezolan T |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Elektromechanische Eigenschaften** | | | | | | | |
| $k_r$ | | 0,30 | 0,45 | 0,45 | 0,48 | 0,60 | 0,40 |
| $k_{33}$ | | 0,42 | 0,57 | 0,55 | 0,58 | 0,69 | |
| $k_{31}$ | | 0,18 | 0,26 | 0,26 | 0,28 | 0,33 | 0,23 |
| $k_{15}$ | | | 0,55 | 0,53 | 0,60 | 0,65 | 0,59 |
| $k_t$ | | | 0,42 | 0,40 | 0,47 | | |
| $d_{33}$ | $10^{-12}$ mV$^{-1}$ | 120 | 205 | 200 | 215 | 380 | 210 |
| $d_{31}$ | | – 50 | – 85 | – 60 | – 90 | – 150 | – 80 |
| $d_{15}$ | | | 310 | 265 | 380 | 520 | 370 |
| $g_{33}$ | $10^{-3}$ mN$^{-1}$ | 11,9 | 23 | 27,5 | 31 | 20 | |
| $g_{31}$ | | | – 9,5 | – 8,5 | – 14,9 | – 9,5 | – 7,7 |
| $g_{15}$ | | | 34 | 34 | 49 | 35 | 29 |
| $e_{33}$ | Nm$^{-1}$ V$^{-1}$ | 11 | 12,5 | 12 | | | |
| $N_r$ | Hz · m | 3000 | 2300 | 2200 | 2150 | 2100 | |
| $N_l$ | | 2300 | 1670 | 1680 | 1540 | 1690 | 1620 |
| $N_d$ | | 2500 | 1950 | 2100 | 2000 | 2150 | |
| $N_s$ | | | 1050 | 1060 | 1030 | 950 | 1020 |

Anmerkung zu den Werkstoffdaten:

Für die Bestimmung verschiedener Konstanten sind entsprechend den genannten Anregungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der Orientierung verschiedene Wandlerformen mit definierten geometrischen Verhältnissen erforderlich. Im allgemeinen sind die in der Praxis gebräuchlichen Abmessungen für die Messung bestimmter Konstanten wenig geeignet. Zudem sind die angegebenen Werte Richtgrößen. Für die Lieferung sind jeweils die im Typensortiment genannten Bedingungen verbindlich.

## 7.2. Temperatur- und Zeitstabilität

| Eigenschaft | Piezolan A | Piezolan F | Piezolan L | Piezolan S | Piezolan S 2 | Piezolan T |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Curietemperatur °C | 150 | 290 | 300 | 350 | 270 | 350 |
| Max. Einsatztemp. °C | 100 | 160 | 150 | 200 | 150 | 120 |
| Änderung d. Resonanzfrequenz im Bereich von – 40 °C bis + 60 °C % | 4 | 0,2 | 1,5 | 4 | | 0,5 |
| Spez. Widerstand Ohm m | | | | | | |
| 25 °C | $10^{10}$ | $5 \cdot 10^8$ | $10^{10}$ | $10^{11}$ | | $5 \cdot 10^9$ |
| 100 °C | $5 \cdot 10^8$ | $10^7$ | $5 \cdot 10^8$ | $5 \cdot 10^9$ | | |
| Zeitkonstante s | | | | | | |
| 25 °C | 100 | 5 | 200 | 1000 | | |
| 100 °C | 5 | 0,1 | 10 | 40 | | |
| Alterung der Resonanzfrequenz %/Dekade | | + 0,2 | + 0,4 | | | + 0,2 |
| Alterung von $k_r$ %/Dekade | – 10 | – 1 | – 2 | – 4 | | |

### 7.3. Großsignalwerte

| Eigenschaften | Piezolan A | Piezolan L | Piezolan S |
|---|---|---|---|
| Durchschlagsfestigkeit im Gleichfeld, E | 20 | 50 | 50 |
| Depolarisationsfeldstärke (50-Hz-Wechselfeld) | 3 | 6 | 8,5 |
| Wechselfeld für tan $\delta = 0{,}04$, 25 °C | 1,5 | 0,2 | 3 |
| prozentualer Anstieg von $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$ bei der obigen Feldstärke | 5 | 10 | 20 |
| Zugfestigkeit, statisch | 300 | 400 | 400 |
| Druckfestigkeit, statisch | 1500 | 2500 | 2500 |
| max. Betriebsdruck | 100 | 100 | 500 |
| Depolarisation bei max. Betriebsdruck | | −0 % | −5 % |

(elektrische Feldstärke in $kV \cdot cm^{-1}$ oder $10^5 V \cdot m^{-1}$, mechanische Festigkeit in $10^5 N \cdot m^{-2}$)

## 8. Allgemeine Charakteristik der Piezolan-Werkstoffe und Hinweise für die Anwendung

**Piezolan A** ist ein Bleibariumtitanat, das eine Curietemperatur von 150 °C besitzt und überall da eingesetzt werden kann, wo hohe Betriebstemperatur und hohe Empfindlichkeit nicht erforderlich sind. Früher erfolgte der Einsatz vor allem als Ultraschallschwinger in vielfältigen Formen. Die geringe Stabilität des Werkstoffes und die begrenzte Leistungsfähigkeit erfordert in vielen Fällen den Einsatz von besseren, für die jeweilige Anwendung spezifischen Werkstoffen. Wandler aus Piezolan A sind deshalb mit Ausnahme von Rohren nicht für Neuentwicklungen einzusetzen.

**Piezolan F** ist ein modifiziertes Bleizirkonattitanat mit ausgezeichneten Eigenschaften für Anwendungen in der Nachrichtentechnik: gute thermische und zeitliche Stabilität, hoher Kopplungsfaktor und geringe mechanische Verluste. Vorzugsweise wird dieses Material für elektromechanische Frequenzfilter verwendet (vgl. hierzu die diesbezügliche Dokumentation).

Der Scherkopplungsfaktor ist ausreichend groß für den Einsatz von Piezolan F-Wandlern in Ultraschallverzögerungsleitungen, z. B. für Farbfernsehempfänger.

Die Lieferung von Piezolan F-Wandlern erfolgt nach besonderer Vereinbarung.

**Piezolan L** ist ein modifiziertes Bleizirkonattitanat mit hoher Zuverlässigkeit beim Einsatz für leistungsfähige Ultraschallschwinger, vorzugsweise in der Ultraschallerzeugung, Echolotung und in der Medizinelektronik. Das Material besitzt eine hohe elektrische und mechanische Festigkeit. Der Curiepunkt liegt bei etwa 300 °C. Besonders geeignet ist Piezolan L auch für Piezozünder.

**Piezolan S** ist ein modifiziertes Bleizirkonattitanat mit großer Empfindlichkeit (großer elektromechanischer Kopplungsfaktor, große g-Konstante) und ist über einen großen Temperaturbereich besonders für Schwingungsaufnehmer geeignet. Der Einsatz ist bis etwa 200 °C möglich. Die niedrige mechanische Güte begünstigt den Impulsbetrieb (Materialprüfung). Typische Anwendungen sind Elemente für Tonabnehmer, Mikrofone, Hydrofone und elektrooptische Modulatoren in der Lasertechnik.

**Piezolan S 2** ist ein modifiziertes Bleizirkonattitanat mit hoher Dielektrizitätskonstante und großem piezoelektrischen Effekt. Elektromechanische Wandler aus diesem Material werden vorzugsweise als Biegeelemente ausgeführt, die in Schallwandlern (Mikrofone, Ohrhörern), Tonabnehmern, Stellgliedern und Relais sowie Luft-Ultraschallschwingern zum Einsatz kommen können.

## 9. Typensortiment

Das Standardlieferprogramm umfaßt einige besonders gekennzeichnete Vorzugstypen, die nach Möglichkeit von den Anwendern eingesetzt werden sollten. Für diese Erzeugnisse existieren spezielle Lieferbedingungen. Für die jeweiligen geometrischen Formen werden die möglichen Abmessungen und Resonanzfrequenzen angegeben. Nach Vereinbarung sind auch Spezialanfertigungen möglich, insbesondere für Neuentwicklungen.

Die Kontaktierung der Wandler erfolgt im allgemeinen durch Silberelektroden, die bei hohen Temperaturen eingebrannt wurden. Diese Silberelektroden sind etwa 5–10 $\mu$m stark, und die Haftfestigkeit beträgt ca. 250 kp · $cm^{-2}$.

In speziellen Fällen, insbesondere für Wandler im hochfrequenten Gebiet können die Elektroden auch im Vakuum aufgedampft sein, als Elektrodenmetall kommt dann vorzugsweise Kupfer in Frage.

Für die Formen der Elektroden bestehen folgende Möglichkeiten

- Vollversilberung der gegenüberliegenden Elektrodenflächen
- Versilberung mit Isolationsrand
- Sonderversilberung (insbesondere bei Schwingern für Tastköpfe zur Materialprüfung)

Bei der Wahl der Polarisationsrichtung ist zu beachten, daß die geometrische Abmessung in Polarisationsrichtung stets $\leq$ 25 mm bleibt.

Bei der Messung der elektromechanischen Eigenschaften von bestimmten Wandlern des Sortiments treten Diskrepanzen in den Werkstoffdaten auf, die folgende Ursachen haben können:

Die Werkstoffdaten werden nicht erreicht, da das Material nicht auspolarisiert ist (geometrische Abmessung in Polarisationsrichtung!)

In das Material ist Elektrodenmetall eindiffundiert (merklich bei sehr dünnen Platten und Stäben).

Die Wandler haben spezielle Elektroden.

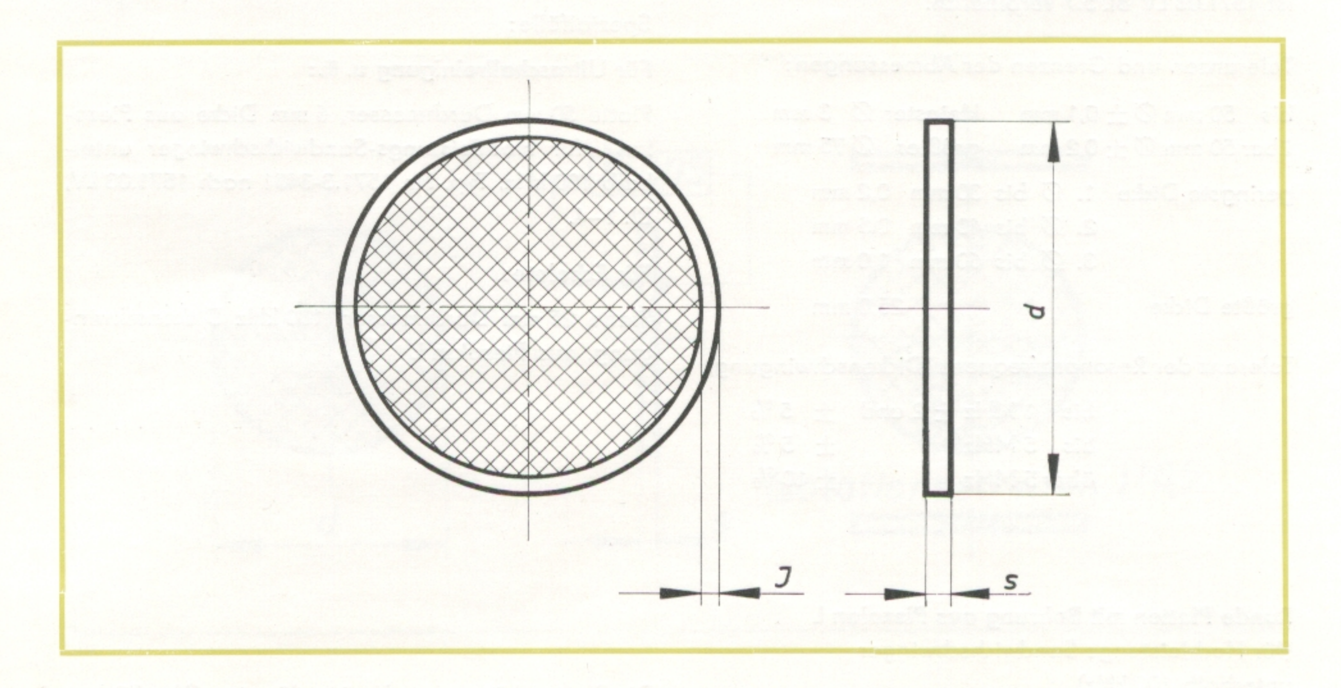
Es wirken Formfaktoren, denn die definierten elektromechanischen Konstanten können nur bei Einhaltung bestimmter geometrischer Verhältnisse gemessen werden.

| Anregungsart | Konstanten | Abmessungen |
|---|---|---|
| Flächendehnung, radial | $k_r$ | $\frac{D}{s} > 10$ |
| Längsdehnung, transversal longitudinal | $k_{31}$, $g_{31}$, $d_{31}$ | $\frac{l}{s} ; \frac{l}{b} > 10$ |
| Scherung | $k_{15}$, $g_{15}$, $d_{15}$ | $l > 2\,b$ |

**Runde Platten als Dickenschwinger aus Piezolan L und S**

1571.3

J = 0 mm, oder
J = 1 mm bis 40 mm ∅
J = 1,5 mm ab 40 mm ∅




**Standarddurchmesser und -Resonanzfrequenzen der Dickenschwingung**

Frequenz (MHz)

| Durchmesser in mm | 10 | 7,5 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2,4 | 2 | 1,5 | 1,25 | 1 | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,25 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 2136* | 2135 | 2134 | 2133 | 2132 | 2131 | | | | | | | | | |
| 5 | 2236 | 2235 | 2234 | 2233 | 2232 | 2231 | | | | | | | | | |
| 8 | 2336 | 2335 | 2334 | 2333 | 2332 | 2331 | 2329 | 2328 | 2327 | | | | | | |
| 10 | 2436 | 2435 | 2434 | 2433 | 2432 | 2431 | 2429 | 2428 | 2427 | 2426 | 2425 | | | | |
| 12 | 2536 | 2535 | 2534 | 2533 | 2532 | 2531 | 2529 | 2528 | 2527 | 2526 | 2525 | | | | |
| 14 | 2636 | 2635 | 2634 | 2633 | 2632 | 2631 | 2629 | 2628 | 2627 | 2626 | 2625 | 2624 | 2623 | | |
| 15 | 2736 | 2735 | 2734 | 2733 | 2732 | 2731 | 2729 | 2728 | 2727 | 2726 | 2725 | 2724 | 2723 | | |
| 20 | 2836 | 2835 | 2834 | 2833 | 2832 | 2831 | 2829 | 2828 | 2827 | 2826 | 2825 | 2824 | 2823 | 2822 | 2821 |
| 25 | | | 2934 | 2933 | 2932 | 2931 | 2929 | 2928 | 2927 | 2926 | 2925 | 2924 | 2923 | 2922 | 2921 |
| 30 | | | | | | | 3129 | 3128 | 3127 | 3126 | 3125 | 3124 | 3123 | 3122 | 3121 |
| 31 | | | | | | | 3229 | 3228 | 3227 | 3226 | 3225 | 3224 | 3223 | 3222 | 3221 |
| 40 | | | | | | | | 3328 | 3327 | 3326 | 3325 | 3324 | 3323 | 3322 | 3321 |
| 50 | | | | | | | | | 3427 | 3426 | 3425 | 3424 | 3423 | 3422 | 3421 |
| 54 | | | | | | | | | 3527 | 3526 | 3525 | 3524 | 3523 | 3522 | 3521 |
| 60 | | | | | | | | | 3627 | 3626 | 3625 | 3624 | 3623 | 3622 | 3621 |
| 75 | | | | | | | | | 3727 | 3726 | 3725 | 3724 | 3723 | 3722 | 3721 |

* Typen-Nummer vollständig 1571.3-2136 . . ., einschl. der Werkstoff-Nr. für Piezolan A = 91, Piezolan S = 92 und Piezolan L = 94, als elfstellige Zahl bei Bestellung anzugeben.

Standardtypen mit laufender Typ-Nr., davon sind die Typen Nr. 1571.3-2624 und Nr. 1571.3-3224 auch noch aus Piezolan A lieferbar, als Lieferbedingung ist 1571.03 LV Bl. 5.7 verbindlich.

Toleranzen und Grenzen der Abmessungen:

| | | | |
|---|---|---|---|
| bis 50 mm ∅ ± 0,1 mm | | kleinster ∅ | 3 mm |
| über 50 mm ∅ ± 0,2 mm | | größter ∅ | 75 mm |

| | | |
|---|---|---|
| geringste Dicke | 1. ∅ bis 30 mm | 0,2 mm |
| | 2. ∅ bis 40 mm | 0,5 mm |
| | 3. ∅ bis 60 mm | 1,0 mm |
| größte Dicke | | 25,0 mm |

Toleranz der Resonanzfrequenz (Dickenschwingung)

| | |
|---|---|
| bis 1 MHz ± 2 und | ± 5 % |
| bis 5 MHz | ± 5 % |
| über 5 MHz | ± 10 % |

Nach Vereinbarung sind auch andere Resonanzfrequenzen (Dicken) und Platten mit Bohrung möglich.

Spezialfälle:

**Für Ultraschallreinigung u. ä.:**

Platte 50 mm Durchmesser, 6 mm Dicke aus Piezolan L für Hochleistungs-Sandwichschwinger unterhalb 100 kHz, Typ.-Nr. 1571.3-3451 nach 1571.03 LV, Bl. 1–4.

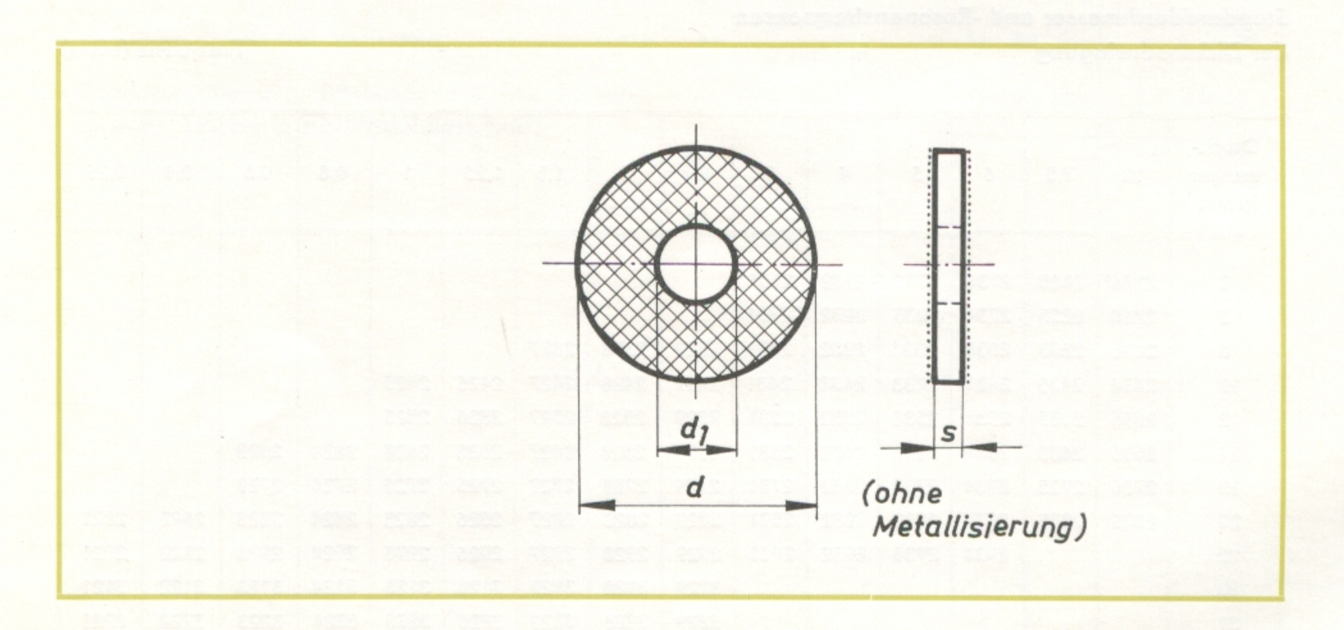
**Für Echolote:**

Platte 25 mm Durchmesser, 180 kHz Dickenschwingung, aus Piezolan L

**Runde Platten mit Bohrung aus Piezolan L**
(für Hochleistungs-Sandwichschwinger unterhalb 100 kHz)

1571.3

Die Platten können auch mit geläppten Oberflächen ohne Elektroden geliefert werden.

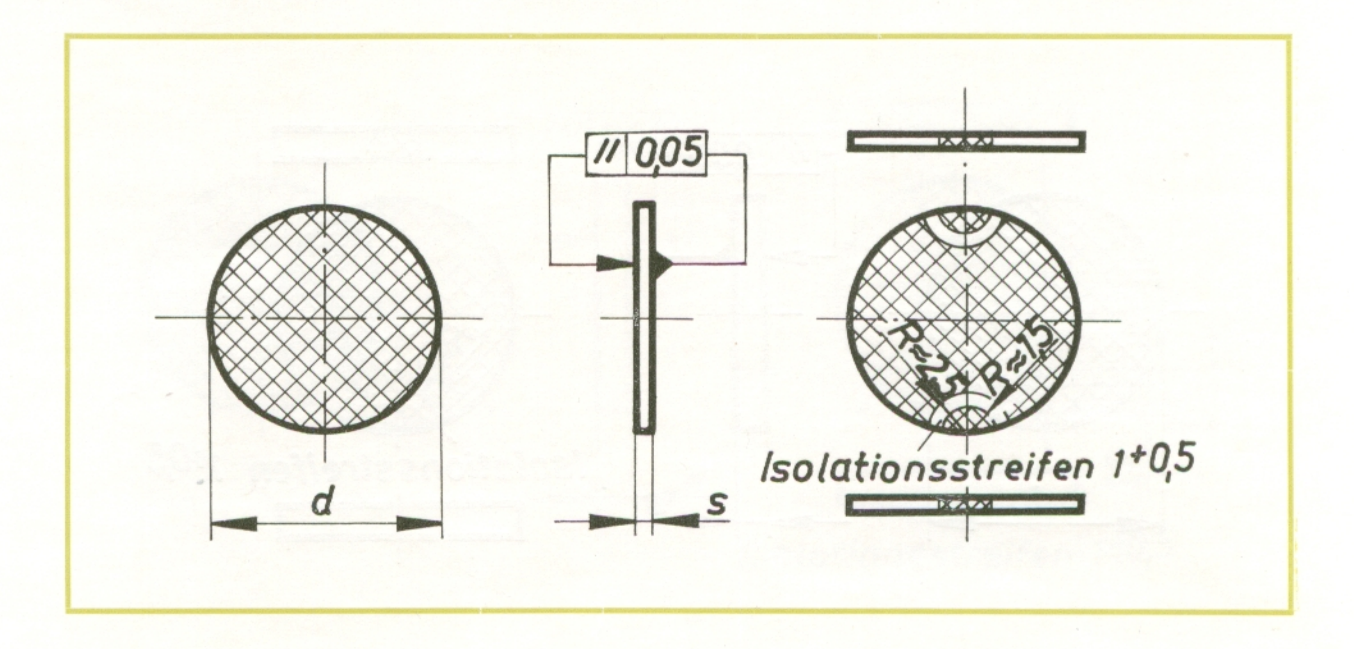



| Typ-Nr. | d ± 0,1 mm | $d_1$ ± 0,1 mm | s ± 0,1 mm |
|---|---|---|---|
| 5351* | 30 | 15 | 6 |
| 5151 | 35 | 15 | 6 |
| 5551 | 50 | 15 | 6 |
| 5451 | 50 | 20 | 6 |

* vollständige Typ-Nr. 1571.3–5351.94

**Runde Platten als Dickenschwinger**
**aus Piezolan S und Piezolan S 2**
mit Versilberungsart $S_2 + S_4$

1571.3



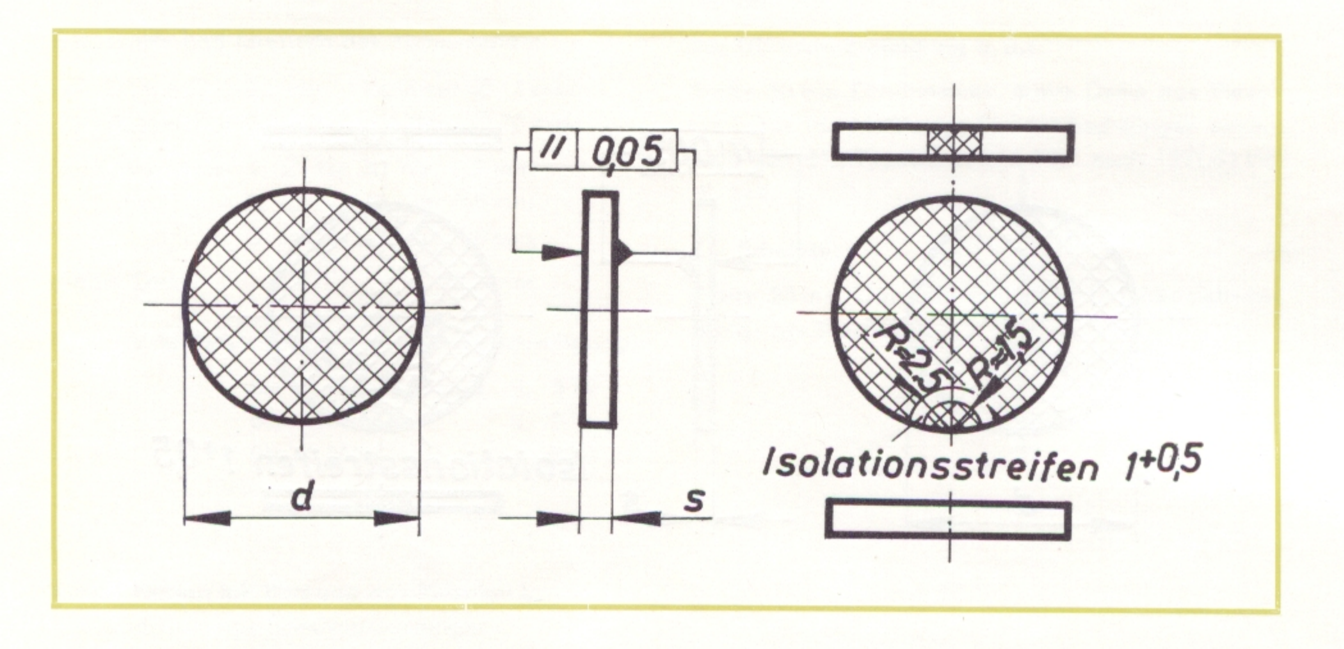

| Durchmesser in (mm) | Frequenz (MHz) | 10 | 7,25 | 6 | 4 | 2 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | | 7136* | 7146 | 7134 | 7132 | 7128 | 7125 |
| 12 | | 7236 | 7246 | 7234 | 7232 | 7228 | 7225 |
| 15 | | 9736 | 9746 | 9734 | 9732 | 9728 | 9725 |
| 20 | | 7536 | 7546 | 7534 | 7532 | 7528 | 7525 |
| 25 | | 7636 | 7646 | 7634 | 7632 | 7628 | 7625 |
| 30 | | 7836 | 7846 | 7834 | 7832 | 7828 | 7825 |

* vollständige Typ-Nr. 1571.3–7136.92 (.92 für Piezolan S, für Piezolan S 2: .97)

**Runde Platten als Dickenschwinger**
**aus Piezolan S und Piezolan S 2**

mit Versilberungsart $S_5$

1571.3

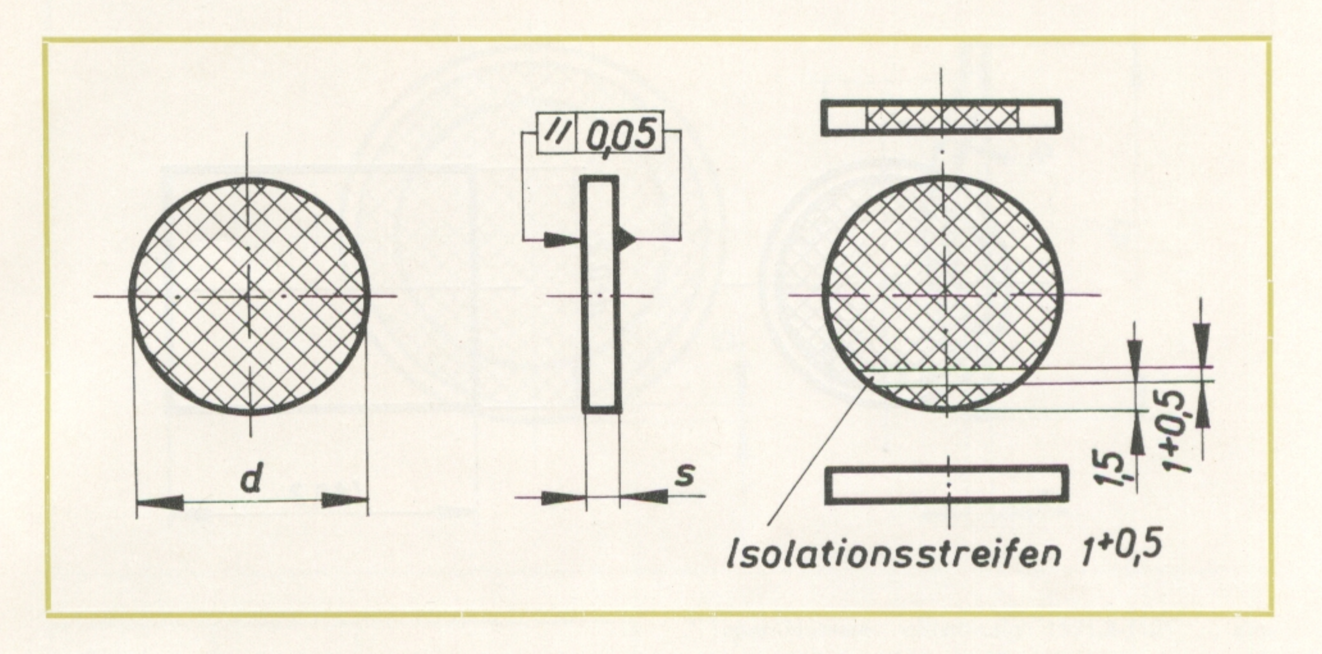



| Durchmesser in (mm) | Frequenz (MHz) | 10 | 7,25 | 6 | 4 | 2 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | | 8836* | 8846 | 8834 | 8832 | 8828 | 8825 |
| 12 | | 8936 | 8946 | 8934 | 8932 | 8928 | 8925 |
| 15 | | 9236 | 9246 | 9234 | 9232 | 9228 | 9225 |
| 20 | | 9336 | 9346 | 9334 | 9332 | 9328 | 9325 |
| 25 | | 9436 | 9446 | 9434 | 9432 | 9428 | 9425 |
| 30 | | 9636 | 9646 | 9634 | 9632 | 9628 | 9625 |

* vollständige Typ-Nr. 1571.3–8836.92 (.92 für Piezolan S. für Piezolan S 2: .97)

**Runde Platten als Dickenschwinger**
**aus Piezolan S und Piezolan S 2**
mit Versilberungsart $S_3$

1571.3

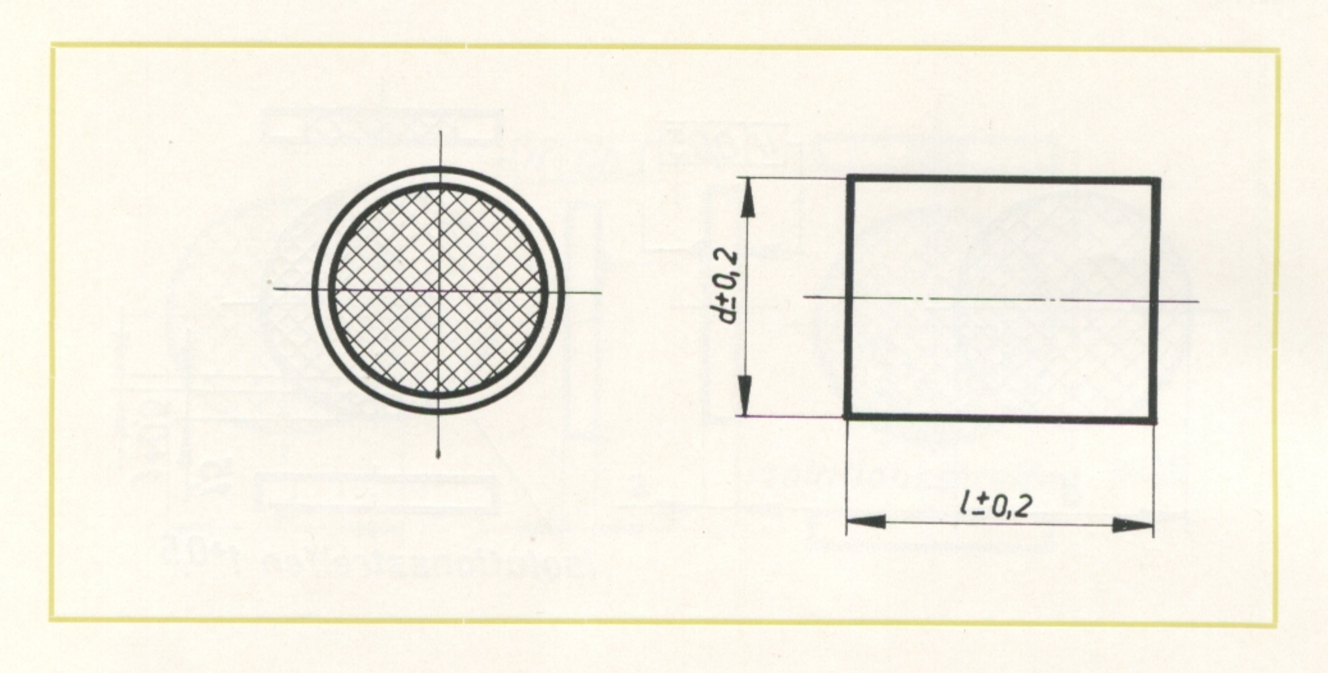



| Durchmesser in (mm) | Frequenz (MHz) | 10 | 7,25 | 6 | 4 | 2 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | | 7936* | 7946 | 7934 | 7932 | 7928 | 7925 |
| 12 | | 8136 | 8146 | 8134 | 8132 | 8128 | 8125 |
| 15 | | 8336 | 8346 | 8334 | 8332 | 8328 | 8325 |
| 20 | | 8436 | 8546 | 8434 | 8432 | 8428 | 8425 |
| 25 | | 8536 | 8446 | 8434 | 8532 | 8528 | 8525 |
| 30 | | 8736 | 8746 | 8734 | 8732 | 8728 | 8725 |

* vollständige Typ-Nr. 1571.3–7936.92 (.92 für Piezolan S, für Piezolan S 2: .97)

**Piezozünder** aus Piezolan L

1577.3

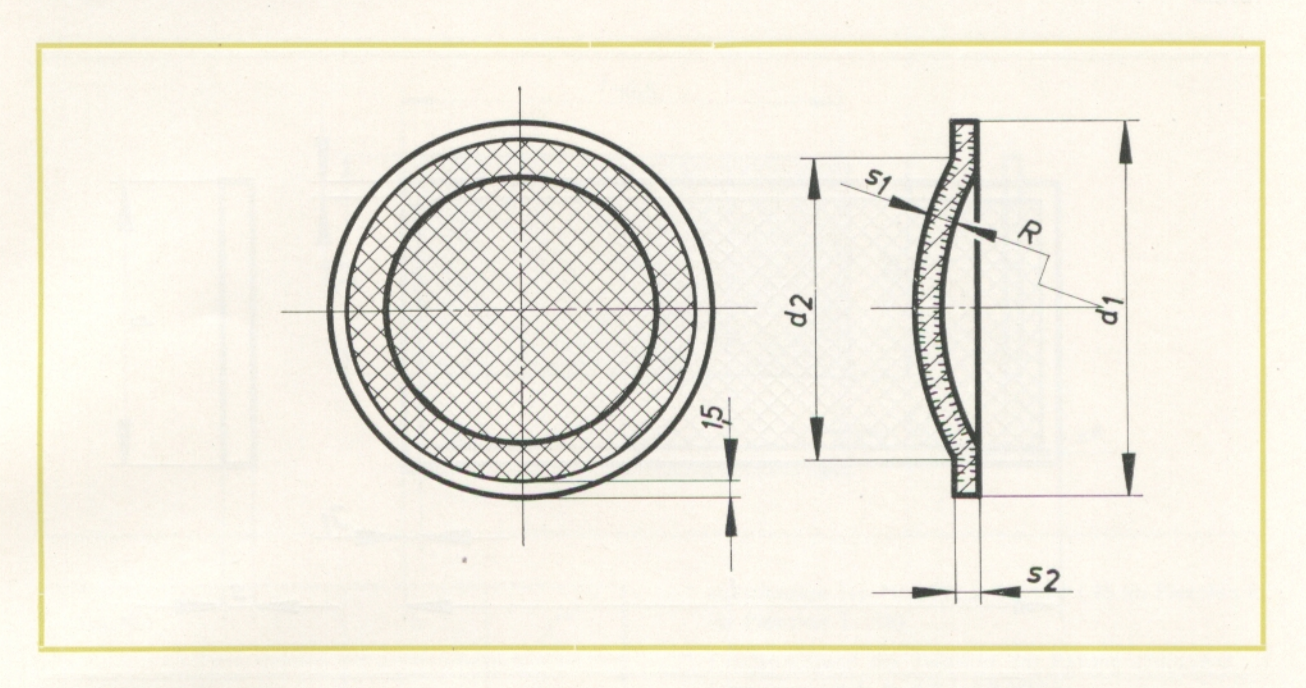



| Typ-Nr. | d | l |
|---|---|---|
| 2324* | 16 | 20 |
| 2223 | 7 | 15 |
| 2222 | 7 | 10 |
| 2622 | 5 | 10 |
| 2526 | 4 | 6 |
| 2425 | 3 | 5 |
| 2428 | 3 | 4 |

* vollständige Typ-Nr. 1577.3-2324.94

**Fokusschwinger aus Piezolan L**

1571.3




| Dicken-Resonanz-frequenz (MHz) | $d_1/d_2$ (mm) | R (mm) 50 | 75 |
|---|---|---|---|
| | 40/35,5 | 1112* | |
| 0,8 | 54/44 | 1121 | 1122 |
| | 75/65 | 1131 | 1132 |
| 0,4 | 75/65 | | 1133 |

* Typen-Nummer, vollständig: 1571.3-1121 . . ., einschl. der Werkstoff-Nr. für Piezolan L = 94, als elfstellige Zahl bei Bestellung anzugeben.

Für die übrigen Typen entsprechend.

Für den Schwinger 1571.3-1122 aus Piezolan L erfolgt die Lieferung nach 1571.01 LV, Bl. 1–3.

Der Schwinger 1571.3-5015 wird nach 1571.01 LV, Bl. 4, auch noch aus Piezolan A geliefert (nicht für Neuentwicklungen!)

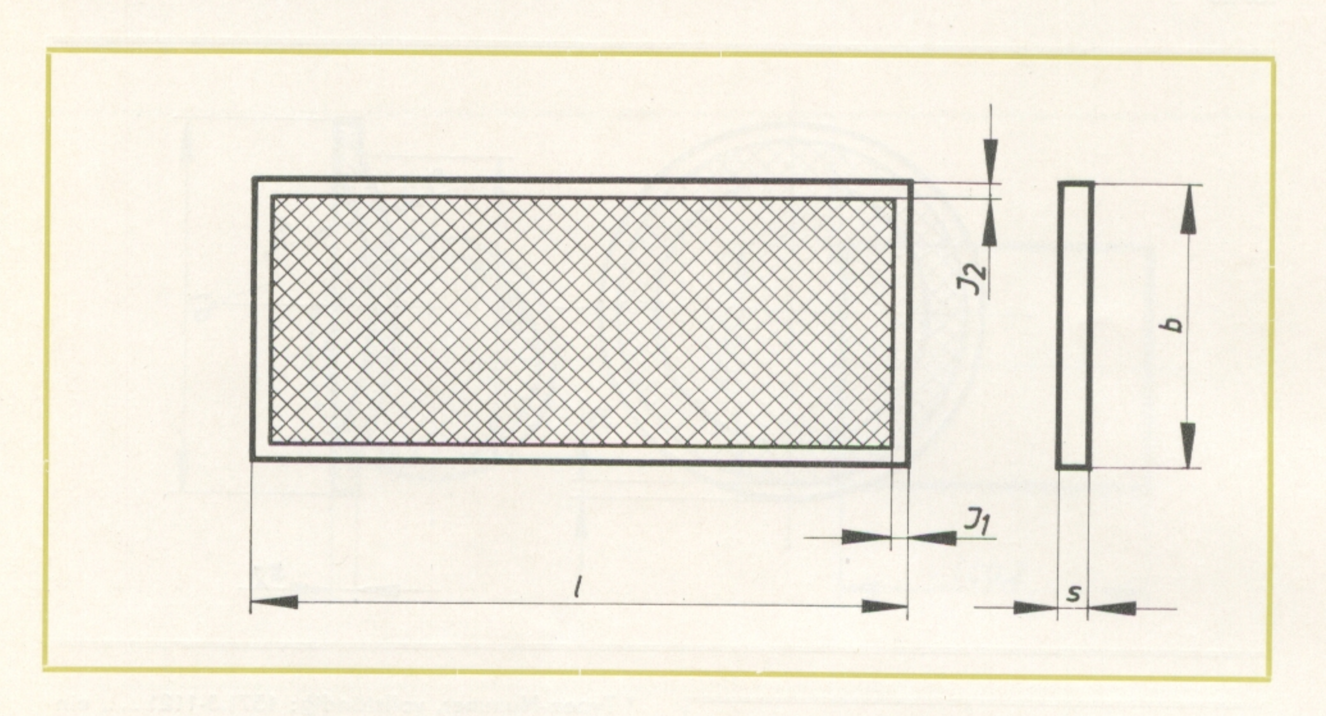
Andere, nicht in der Tabelle gekennzeichnete Geometrien und Resonanzfrequenzen können nur nach besonderer Vereinbarung geliefert werden.

| Typ-Nr. | $d_1 \pm 0{,}1$ (mm) | $d_2 \pm 0{,}1$ (mm) | R (mm) | Dicken-Resonanzfrequenz (MHz) |
|---|---|---|---|---|
| 1112* | 40 | 35,5 | 50 | 0,800 |
| 1121 | 54 | 44 | 50 | 0,800 |
| 1122 | 54 | 44 | 50 | 0,800 |
| 1131 | 75 | 65 | 75 | 0,800 |
| 1132 | 75 | 65 | 75 | 0,800 |
| 1133 | 75 | 65 | 75 | 0,400 |

* vollständige Typ-Nr. 1571.3–1112.94

**Rechteckige Platten als Dickenschwinger, aus Piezolan L und S**

1572.3




**Standardabmessungen und -Resonanzfrequenzen der Dickenschwingung** Frequenz (MHz)

| L × b (mm) | 10 | 7,5 | 5 | 4 | 2 | 1 | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,5 × 10* | 2131 | 2129 | 2128 | 2127 | 2126 | | | | | |
| 5 × 10 | 2231 | 2229 | 2228 | 2227 | 2226 | | | | | |
| 7 × 10 | 2331 | 2329 | 2328 | 2327 | 2326 | 2325 | | | | |
| 10 × 10 | 2431 | 2429 | 2428 | 2427 | 2426 | 2425 | | | | |
| 10 × 15 | 2531 | 2529 | 2528 | 2527 | 2526 | 2525 | 2524 | | | |
| 10 × 17 | 2631 | 2629 | 2628 | 2627 | 2626 | 2625 | 2624 | | | |
| 10 × 20 | 2731 | 2729 | 2728 | 2727 | 2726 | 2725 | 2724 | | | |
| 13 × 24 | 2831 | 2829 | 2828 | 2827 | 2826 | 2825 | 2824 | | | |
| 15 × 15 | 2931 | 2929 | 2928 | 2927 | 2926 | 2925 | 2924 | | | |
| 15 × 16 | 3131 | 3129 | 3128 | 3127 | 3126 | 3125 | 3124 | | | |
| 15 × 18 | 3231 | 3229 | 3228 | 3227 | 3226 | 3225 | 3224 | 3223 | | |
| 20 × 25 | 3331 | 3329 | 3328 | 3327 | 3326 | 3325 | 3324 | 3323 | 3322 | 3321 |
| 25 × 25 | 3431 | 3429 | 3428 | 3427 | 3426 | 3425 | 3424 | 3423 | 3422 | 3421 |

Oberhalb 1 MHz nur aus Piezolan S. Standardtypen mit laufender Typ-Nr., bei Bestellung anzugeben.

Toleranz der Abmessungen und Resonanzfrequenz (Dickenschwingung) Länge, Breite ± 0,1 mm

Resonanzfrequenz bis 5 MHz ± 5 %
bis 10 MHz ± 10 %

Grenzen der Abmessungen für Sonderfälle
kleinste Kantenlänge 1 mm, jedoch nicht kleiner als geringste Dicke

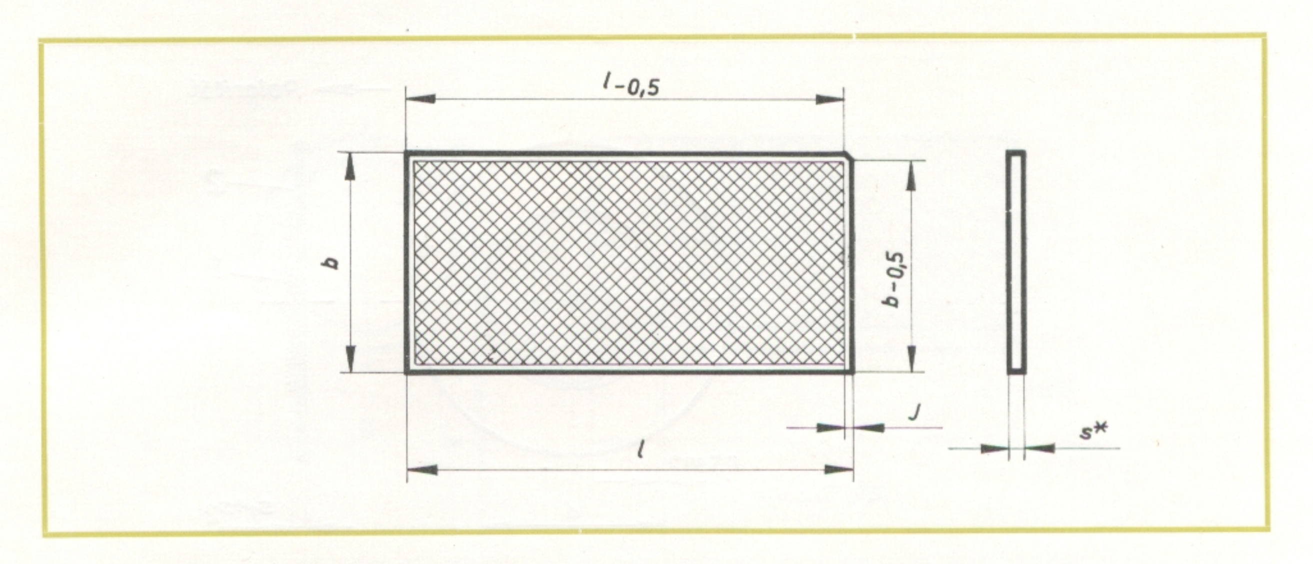
größte Kantenlänge 90 mm

geringste Dicke 1. bis 30 mm Kantenlänge 0,2 mm
2. bis 40 mm Kantenlänge 0,5 mm
3. bis 60 mm Kantenlänge 1,0 mm
4. bis 90 mm Kantenlänge 3,0 mm

größte Dicke 25 mm, jedoch nicht größer als kleinere Kante

**Scherschwinger für Ultraschallverzögerungsleitungen aus Piezolan F und Piezolan T**

1572.3




| Typ-Nr. | l | b | s** |
|---|---|---|---|
| 5151* | 10 | 6 | 0,25 |
| 5252 | 12 | 10 | 0,25 |
| 5352 | 15 | 10 | 0,25 |

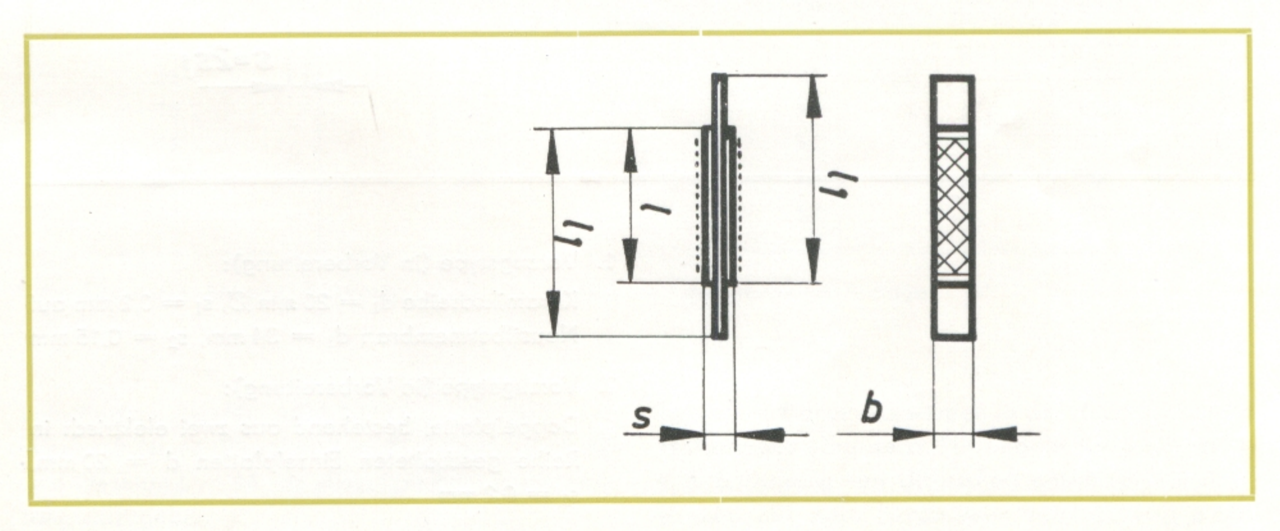
* vollständige Typ-Nr. 1572.3–5151.95 (.95 für Piezolan F, für Piezolan T: .96)

** s entsprechend der Toleranz der Resonanzfrequenz (vorzugsweise $f_s$ = 4,2 ± 0,2 MHz)

Elektrodenmaterial: Cu 0,5–1,0 µm, lötfähig.

**Stabförmige Biegeelemente aus Piezolan S 2**
als elektroakustische Wandler und Stellglieder
(zwei Stäbe mittels Epoxidharz verklebt)

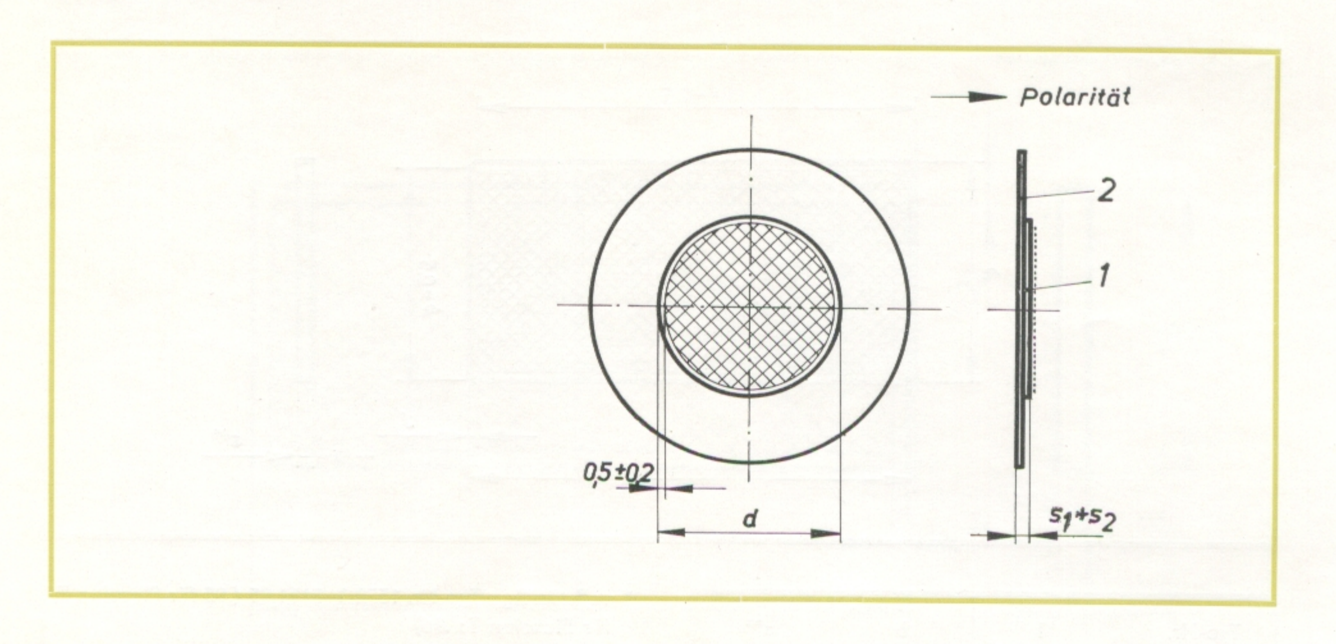
1572.5

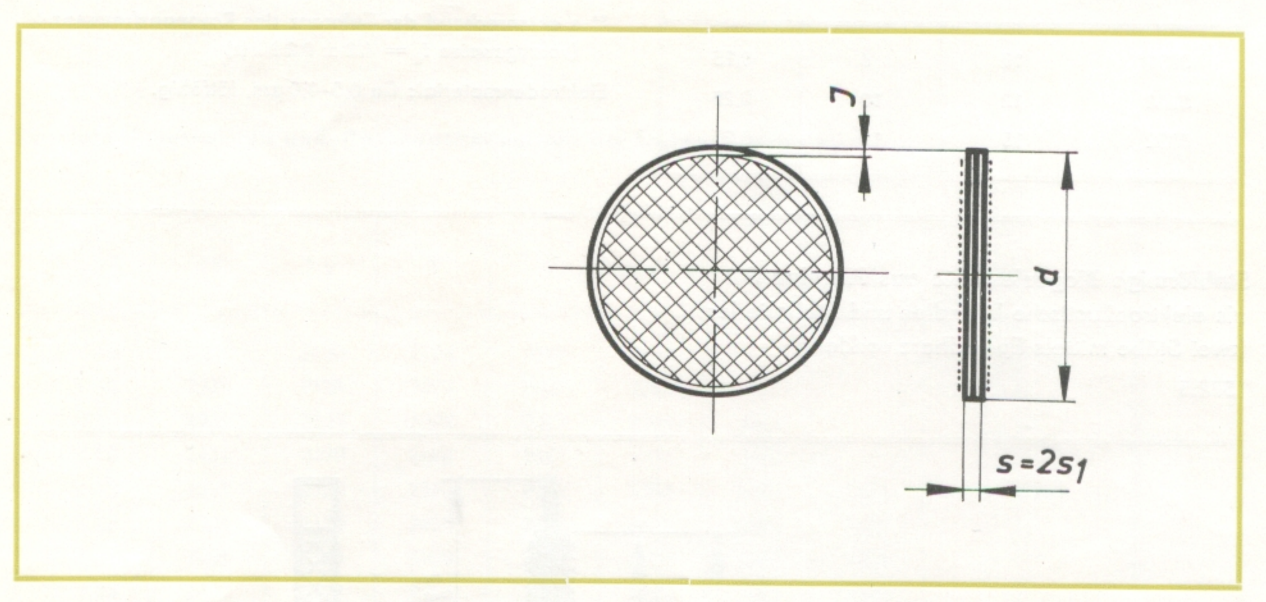



1. Vorzugstype 1572.5–8181.00: elektrische Parallelschaltung der beiden Teilelemente, mit den Abmessungen 10 × 2,4 × 0,5; Kupferfolie als mittlere Elektrode
2. Vorzugstype 1572.5–8382.00: elektrische Reihenschaltung der beiden Teilelemente, mit den Abmessungen 14 × 1,8 × 0,5
3. Mögliche Abmessungen der Biegeelemente in elektrischer Reihenschaltung (auf besondere Anfrage):

   l = 10 ···55 mm
   b = 1,0···20 mm
   s = 0,2··· 1,0 mm
   für die einzelnen Stäbe

**Biegeplatten aus Piezolan S 2**
(Verklebung der Teilelemente mit Epoxidharz)

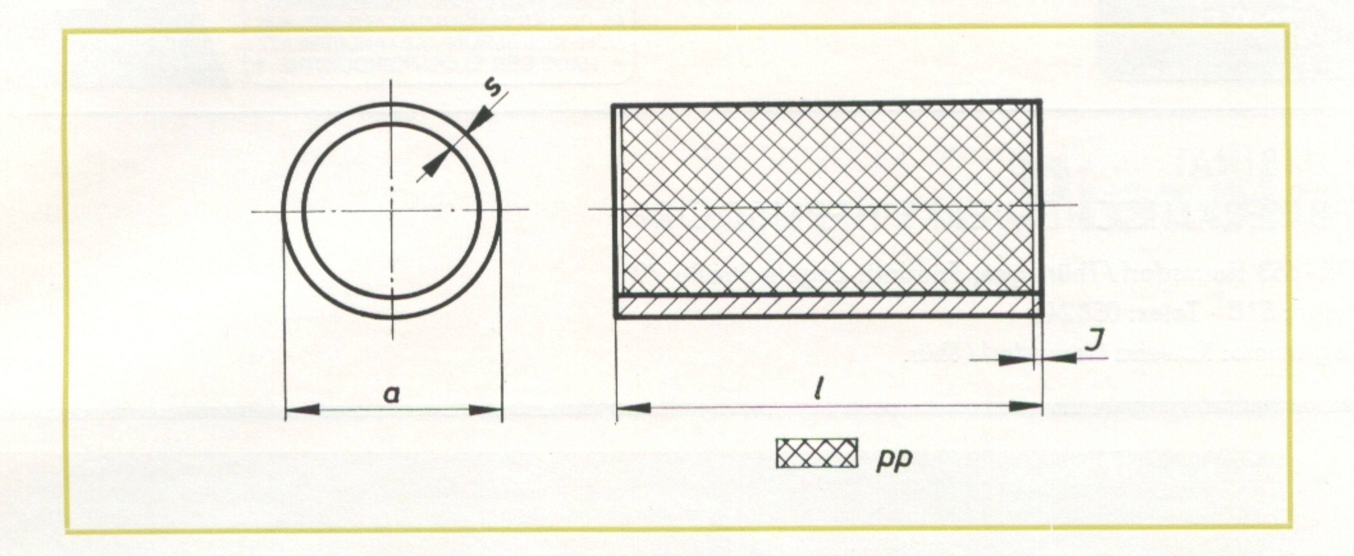



1. Vorzugstype (in Vorbereitung):
   Keramikscheibe $d_1$ = 20 mm ∅, $s_1$ = 0,2 mm auf Neusilbermembran $d_2$ = 34 mm, $s_2$ = 0,15 mm
2. Vorzugstype (in Vorbereitung):
   Doppelplatte, bestehend aus zwei elektrisch in Reihe geschalteten Einzelplatten d = 20 mm, $s_1$ = 0,2 mm
3. Mögliche Abmessungen der Biegeplatten (auf besondere Anfrage)
   d = 10 ···30 mm
   $s_1$ = 0,2··· 1 mm für die einzelnen Keramikplatten

**Rohrförmige Piezolanschwinger**

1573.3




Standardabmessungen für Rohre aus Piezolan A und Piezolan S

| Länge l (mm) | Innenradius (mm) | Wandstärke (mm) | lfd. Typ-Nr. |
|---|---|---|---|
| 7 | 0,35 | 0,3 | 7221* |
| 15 | 3,0 | 2,0 | 3185 |
| 20 | 1,0 | 3,0 | 2221 |
| 25 | 6,8 | 3,2 | 4153 |
| 25 | 10,5 | 1,5 | 4541 |
| 25 | 20,0 | 3,2 | 4651 |
| 25 | 30,0 | 3,2 | 4751 |
| 30 | 4,0 | 1,0 | 5331 |
| 30 | 8,5 | 1,5 | 5441 |
| 30 | 10,0 | 1,5 | 5541 |
| 75 | 15,0 | 3,2 | 6156 |
| 75 | 30,0 | 3,2 | 6751 |
| 200 | 20,0 | 3,2 | 7651** |
| 200 | 30,0 | 3,2 | 7751** |

* Auf besondere Anfrage, Elektroden innen und außen Gold.

** Auf besondere Anfrage

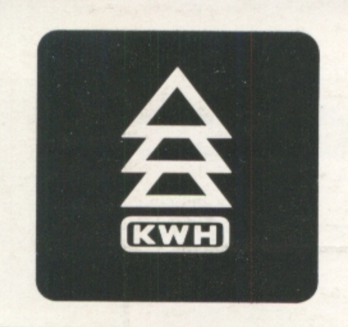
vollständige Typ-Nr. 1573.3-2111 . . ., einschl. der Werkstoff-Nr. für Piezolan A = 91, Piezolan S = 92 und Piezolan L = 94, als elfstellige Zahl bei Bestellung anzugeben.

Toleranz der Abmessungen

Werden Rohre mit hoher Präzision verlangt, gelten die gleichen Toleranzen wie bei Platten (Toleranzgruppe 1). Auf Grund eines anderen Herstellungsverfahrens können Rohre billiger, jedoch mit größeren Toleranzen hergestellt werden. Dafür gilt die Toleranzgruppe 2:

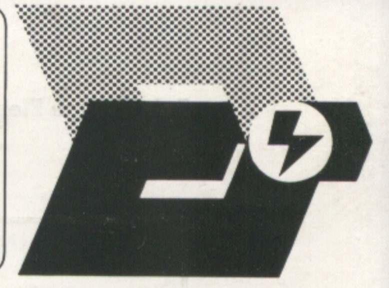
Rohre aus Piezolan S werden in der Hauptsache als Hydrophone eingesetzt. Für andere Anwendungen, z. B. Erzeugung von Ultraschall unterhalb 100 kHz, können nur nach besonderer Vereinbarung auch Rohre aus Piezolan L geliefert werden.

| | | |
|---|---|---|
| Höhe | | ± 0,1 mm |
| Durchmesser | | ± 3,0 % vom Nenndurchmesser |
| Wandstärke | bis 3 mm | ± 0,2 mm |
| | bis 6 mm | ± 0,3 mm |
| Exzentrizität | | ± 2,0 % |









KOMBINAT
VEB KERAMISCHE WERKE HERMSDORF

DDR-653 Hermsdorf/Thüringen, Friedrich-Engels-Straße 79
Telefon: 510 · Telex: 058246
Telegramme: Kaweha Hermsdorf/Thür.

## WIR PRODUZIEREN:

Isolierkörper und Isolatoren
für Apparate und Freileitungen für höchste Spannungen

Elektronische Bauelemente für die Rundfunk-, Fernseh-, Nachrichten-, Meß-, Steuer- und Regelungstechnik und für die Datenverarbeitung

Apparate und Anlagen aus Hartporzellan und Steinzeug für die chemische und artverwandte Industrie

Hochverschleißfeste, hochtemperaturbeständige, korrosionsfeste und elektrisch maximal belastbare oxidkeramische Erzeugnisse für die verschiedensten Indutriezweige

Isolier- und Bauteile für Schaltgeräte, Elektrotechnik, Gas-, Wärme- und Beleuchtungs-Geräte sowie Funken- und Lichtbogenschutz

Bauteile und -elemente der HF-Technik, Tragkörper für Kohleschicht-, Metallschicht- und Drahtwiderstände

Sintermetallische Kontakt- und Stromübertragungselemente, Einbauteile für Röhrentechnik, Uberschwermetalle als Abschirmmaterial für Gammastrahlen

Isolator-Zündkerzen für Otto-Motoren in allen Gewindegrößen und Wärmewerten, Rennkerzen und Spezialkerzen.

Wir erwarten Ihre Anfragen!

Ag 27 (07)/17/75 - 5 - V/15/5 - 341